

УДК 629.4.015

А. В. ПУТЯТО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО НЕДОЛИВА КОТЛА

Разработан алгоритм моделирования продольной динамики железнодорожных цистерн с учетом возможного недолива котла, позволяющий оперативно исследовать эксплуатационные ситуации, связанные с динамикой наливного подвижного состава. Реализация предлагаемого подхода осуществляется в два этапа: разработка моделей для гидродинамического анализа жидкого груза в котле цистерны и разработка динамической модели вагона-цистерны. Первый этап выполняется с использованием программного комплекса ANSYS, где на основе конечно-элементных расчетов определяются траектории движения центра масс жидкого тела и силы его вязкого сопротивления в относительном движении. Разработка на втором этапе твердотельной динамической модели вагона-цистерны в программном комплексе «Универсальный механизм» с применением данных, полученных на первом этапе, позволяет получить динамические характеристики вагона. Выполнена апробация применительно к железнодорожной цистерне модели 15-1443. Установлено, что учет подвижности жидкого тела относительно котла вагона-цистерны существенно влияет на ее динамику.

**К** одному из наиболее стратегических видов железнодорожного подвижного состава в Республике Беларусь следует отнести наливной подвижной состав, который составляет существенную долю вагонного парка грузовых вагонов Белорусской железной дороги. Обеспечение стабильной работоспособности существующего парка вагонов-цистерн путем повышения надежности их элементов конструкций и недопущения аварийных ситуаций при эксплуатации наливного состава – важная практическая задача для Белорусской железной дороги.

Основное отличие эксплуатации наливного подвижного состава заключается в особенностях, связанных с возможностью относительного движения жидкого груза в котле. Вопросам динамики железнодорожных цистерн, в том числе и с учетом подвижности жидкого груза, посвящено большое количество работ. Подходы к моделированию перетекания жидкости в котле цистерны можно разделить на два направления: представление жидкого груза как эквивалентного твердого тела (системы тел) и рассмотрение груза как сплошной среды. Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки. Так, например, для представления жидкого груза в виде эквивалентного твердого тела, как правило, исследователи предварительно проводят большой объем экспериментальных исследований для определения параметров, определяющих затухание колебаний жидкости [1, 5]. При моделировании жидкости сплошной средой только для рассмотрения перетекания груза в одной цистерне требуются существенные машинные ресурсы [2, 4], и рассмотрение динамики сцепа вагонов может быть затруднительно.

Учитывая дороговизну экспериментальных ис-

следований в рассматриваемой области, возникает необходимость разработки методов, позволяющих выполнять виртуальный мониторинг динамики наливного подвижного состава различных эксплуатационных ситуаций.

**Целью работы** является разработка способа, позволяющего на основе компьютерного моделирования выявить особенности продольной динамики наливного подвижного с учетом возможного частичного заполнения кузова жидким грузом, пригодного к анализу широкого спектра эксплуатационных ситуаций.

**Обобщенный алгоритм решения задачи** приведен на рисунке 1. Поставленная задача решается в два этапа: разработка моделей для гидродинамического анализа жидкого груза в котле цистерны и динамической модели вагона-цистерны.

На первом этапе составлены конечно-элементные модели перетекания жидкого груза в котле железнодорожной цистерны. Схема формирования расчетных моделей для анализа гидродинамических параметров перетекания жидкости в котле цистерны приведена на рисунке 2.

На этапе построения геометрической модели формируется срединная продольная плоскость (2-D постановка задачи) либо объем (3-D постановка задачи) котла. Следует отметить, что в данном случае принято решение о применении различных методов решения задачи – метода конечных элементов для плоской и метода конечных объемов для объемной постановок. Такое решение принято в связи с трудностями разрешения уравнений гидродинамики в случае учета наличия свободной поверхности жидкости в пространстве. Из приведенной схемы видно, что создаваемые расчетные модели позволяют учитывать ряд физико-

механических характеристик перевозимого груза, уровень его налива, а также имеют возможность легко адаптироваться при изменении геометрических характеристик рассматриваемого резервуара (котла), что достигается полной параметризацией модели.



Рисунок 1 – Алгоритм решения задачи

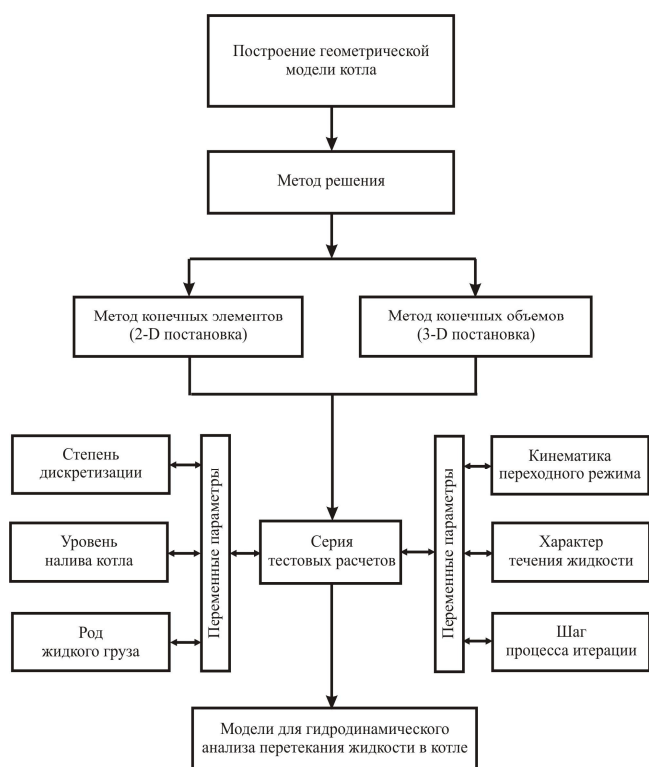


Рисунок 2 – Алгоритм формирования расчетных моделей для анализа гидродинамики жидкости в котле

Реализация разработанных моделей выполнена с использованием программного комплекса ANSYS [6]. В качестве разрешающих уравнений при выполнении гидродинамических расчетов использована система, включающая уравнения движения вязкой жидкости Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \mu \nabla^2 \bar{v}; \text{div } \bar{v} = 0,$$

где  $\bar{v}$  – вектор скоростей частиц жидкости;  $\bar{f}$  – плотность распределения внешних объемных сил, действующих на частицу жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность жидкости в рассматриваемой точке (в рассматриваемом случае жидкость считается несжимаемой, поэтому ее плотность постоянна);  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $\mu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Для определения траектории перемещения центра масс жидкого груза в продольной плоскости рассматривался наиболее опасный с позиции нагруженности конструкции вагона случай – удар о неподвижное препятствие при нормативном уровне налива котла и его частичном заполнении нефтепродуктом (в частности, плотность 870 кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость 0,0006031 кг/м·с). Принималось, что в начальный момент жидкость находилась в состоянии относительного покоя, и ее свободная поверхность была плоской. В качестве кинематического граничного условия принято отсутствие скорости жидкости на стенках котла цистерны. Шаг по времени варьировался от 0,001 с до 0,003 с.

Таким образом, в рамках выполненных расчетов для любого момента времени доступна информация о положении жидкой фракции в котле, и тем самым получена возможность определить для каждого уровня налива траекторию движения центра масс жидкого тела относительно кузова вагона. В таблице 1 приведены траектории движения центра масс (начало отсчета находится в геометрическом центре котла) и положения жидкого груза для различных моментов времени.

Особенностью рассматриваемого подхода является учет сил сопротивления перетеканию жидкого груза в котле цистерны. Для этого задавалось начальное положение, отличное от статического равновесия. Далее под действием силы тяжести жидкость вовлекалась в затухающее колебательное движение. Описанный колебательный процесс дал возможность получить массив данных, содержащий значения координат центров масс жидкого груза для любого момента времени (согласованно с принятым шагом расчета). Выполнив аппроксимацию зависимости продольной координаты  $x_c$  от времени уравнением вида  $x(t) = x_0 + Ae^{-nt} \sin(\pi(t-b)/c)$ , были определены коэффициенты затухания колебательного процесса  $n_x$ , по которым рассчитаны соответствующие составляющие сил сопротивления жидкости

$$F_x^{\text{сопр}} = \alpha_x v_x,$$

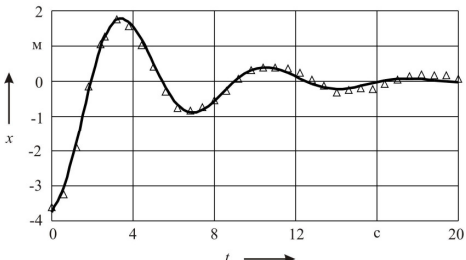
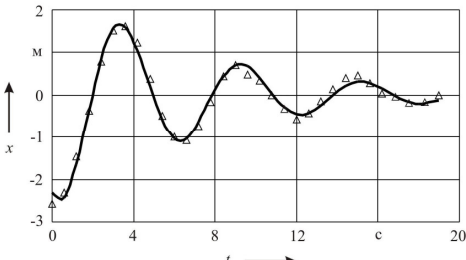
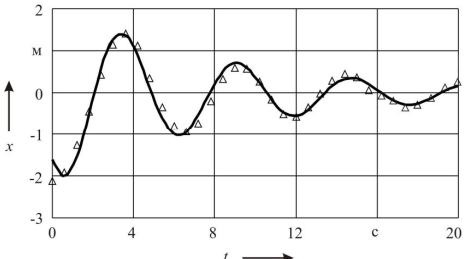
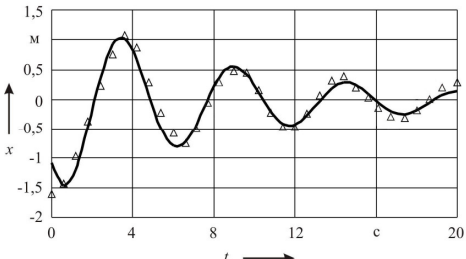
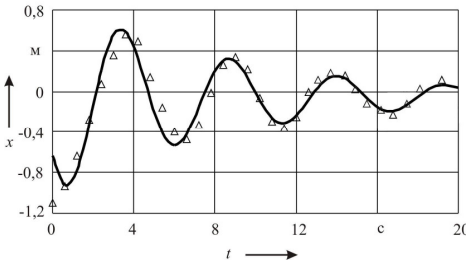
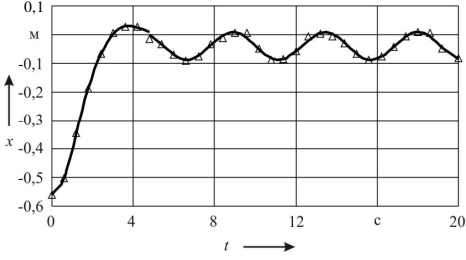
где  $\alpha_x$  – коэффициент удельного сопротивления,  $\alpha_x = 2m_{ж}n_x$ ;  $m_{ж}$  – масса жидкости;  $v_x$  – осевая составляющая скорости центра масс жидкого тела относительно котла.

В таблице 2 на примере жидкого груза, имеющего плотность  $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$  и динамическую вязкость  $\eta = 0,0006031 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ , приведены результаты определения сил сопротивления перетеканию жидкости в котле для различных уровней налива.

Таблица 1 – Траектории движения центра масс (начало отсчета находится в геометрическом центре котла) и положения жидкого груза для различных моментов времени

Траектория центра масс жидкости	$t = 0,1 \text{ с}$	$t = 0,3 \text{ с}$	$t = 0,6 \text{ с}$
Заполнение котла жидкостью – 30 %			
Заполнение котла жидкостью – 50 %			
Заполнение котла жидкостью – 60 %			
Заполнение котла жидкостью – 80 %			
Заполнение котла жидкостью – 90 %			

Таблица 2 – Результаты определения сил сопротивления перетеканию жидкости в котле для различных наливов

Налив котла, %	Расчетные данные и вид аппроксимирующей функции	Уравнение аппроксимирующей функции, масса жидкого груза, сила сопротивления перетеканию жидкого груза в котле
30		$x(t) = -0,015 + 3,764e^{-0,20756t} \sin\left[\frac{\pi(t-1,9)}{3,544}\right];$ $m_{\text{ж}}^{30\%} = 19000 \text{ кг};$ $F_x^{\text{сопр}} = 2m_{\text{ж}}^{30\%} n_x v_x = 2 \cdot 19000 \cdot 0,20756 v_x = 7887 v_x$
50		$x(t) = 0,0066 + 2,68e^{-0,1409t} \sin\left[\frac{\pi(t-1,968)}{2,985}\right];$ $m_{\text{ж}}^{50\%} = 31750 \text{ кг};$ $F_x^{\text{сопр}} = 2m_{\text{ж}}^{50\%} n_x v_x = 2 \cdot 31750 \cdot 0,1409 v_x = 8947 v_x$
60		$x(t) = -0,018 + 2,125e^{-0,11667t} \sin\left[\frac{\pi(t-2,067)}{2,8345}\right];$ $m_{\text{ж}}^{60\%} = 38100 \text{ кг};$ $F_x^{\text{сопр}} = 2m_{\text{ж}}^{60\%} n_x v_x = 2 \cdot 38100 \cdot 0,11667 v_x = 8890 v_x$
70		$x(t) = -0,01935 + 1,56e^{-0,111t} \sin\left[\frac{\pi(t-2,117)}{2,7737}\right];$ $m_{\text{ж}}^{70\%} = 44450 \text{ кг};$ $F_x^{\text{сопр}} = 2m_{\text{ж}}^{70\%} n_x v_x = 2 \cdot 44450 \cdot 0,111 v_x = 9868 v_x$
80		$x(t) = -0,042 + 0,965e^{-0,11215t} \sin\left[\frac{\pi(t-2,102)}{2,657}\right];$ $m_{\text{ж}}^{80\%} = 50800 \text{ кг};$ $F_x^{\text{сопр}} = 2m_{\text{ж}}^{80\%} n_x v_x = 2 \cdot 50800 \cdot 0,11215 v_x = 11394 v_x$
90		<p>– для <math>t = 0 \dots 4,8</math> с</p> $x_1(t) = -0,0296 + 0,6836e^{-0,59t} \sin[\pi(t + 4,7595) / 3,7];$ <p>– для <math>t = 4,8 \dots 20</math> с</p> $x_2(t) = -0,039 + 0,0476e^{-0,35 \cdot 10^{-158}t} \sin[\pi(t - 3,2) / 3,27];$ $m_{\text{ж}}^{90\%} = 57150 \text{ кг};$ $F_x^{\text{сопр}} = 2m_{\text{ж}}^{90\%} n_x v_x = 2 \cdot 57150 \cdot 0,59 v_x = 67437 v_x$

Таким образом, воспользовавшись описанным алгоритмом, можно для любого типа жидкого груза (варьируя соответствующими физико-механическими характеристиками при создании гидродинамической модели), любого налива котла цистерны, а также любой формы резервуара и его объема определить необходимые входные параметры для моделирования жидкого груза (траекторию центра масс жидкости и силу вязкого сопротивления) для последующего анализа динамики вагона. Создание базы данных таких параметров для различных типов жидких грузов, наливов и моделей вагонов-цистерн позволит оперативно выполнять работы, связанные с анализом динамики наливного подвижного состава.

Для анализа продольных колебаний железнодорожной цистерны при различных режимах эксплуатации (этап II) с учетом частичного заполнения котла цистерны с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» [3] разработана трехмерная твердотельная динамическая модель цистерны для перевозки нефтепродуктов модели 15-1443. Динамическая модель включает в себя кузов вагона, состоящий из котла и рамы, расположенных на тележках, модельные характеристики которых соответствуют тележкам модели 18-100, а также автосцепное устройство, включающее силовые элементы, характеристики которых соответствуют поглощающему аппарату Ш-2-В (рисунок 3).

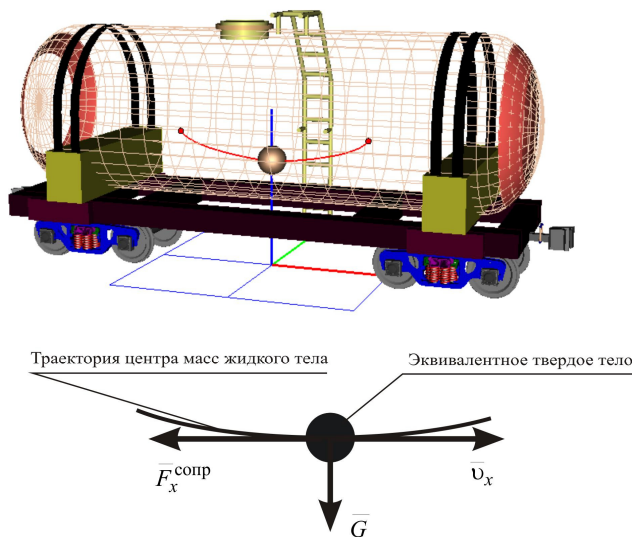


Рисунок 3 – Твердотельная модель вагона-цистерны модели 15-1443 с уровнем заполнения котла жидким грузом 60 %

Геометрические характеристики элементов конструкции вагона определены с использованием модели, разработанной в [4]. Для учета подвижности жидкого груза относительно кузова вагона при различном заполнении котла в программе созданы траектории движения центров масс жидкого тела относительно котла цистерны. Для учета подвижности жидкого груза задана материальная точка,

связанная с кузовом вагона-цистерны контактом типа «точка – кривая», имеющая возможность перемещения относительно кузова по заданной траектории. Кроме того, в модели предусмотрено приложение осевых составляющих сил сопротивления движению эквивалентного твердого тела в зависимости от соответствующих составляющих его скоростей в относительном движении, методика определения которых приведена выше. Для наглядности в описанной динамической модели графический объект оболочки котла показан прозрачным (см. рисунок 3).

**Некоторые результаты расчетов.** Рассмотрим реализацию предложенного подхода на примере анализа динамики одиночной цистерны с наливом котла жидким грузом 60 %. На свободно катящуюся со скоростью 1 м/с по рельсовой колее вагон-цистерну воздействовала продольная сила 0,5 МН в автосцепное устройство в течение 0,5 с по направлению ее движения. На рисунке 4 приведены временные зависимости изменения некоторых кинематических характеристик вагона и груза.

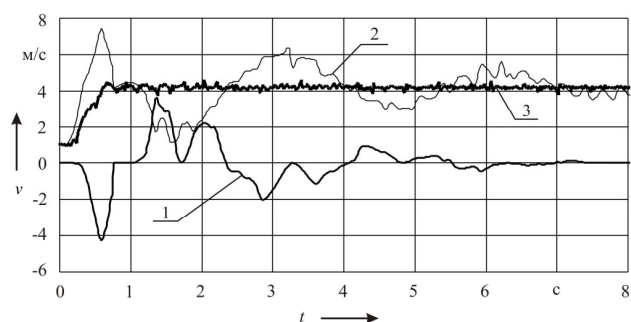


Рисунок 4 – Временные зависимости изменения некоторых кинематических характеристик вагона и груза

Изменение горизонтальной составляющей скорости эквивалентного твердого тела относительно котла вагона-цистерны представлено графиком 1, где наблюдается колебательный процесс с последующим затуханием, что обусловлено действием силы сопротивления движению жидкости в котле (подобную затухающую «синусоиду» имеет график функции  $F_x^{\text{сопр}}(t)$ ). Сопоставление изменений скоростей кузова вагона с учетом подвижности жидкого тела (кривая 2) и без его относительного перемещения (кривая 3) показало существенное отличие в динамических характеристиках вагона.

Анализ вертикальных перемещений головки автосцепного устройства показал, что подвижность жидкости в котле оказывает существенное влияние на этот показатель (рисунок 5). Полученный эффект может стать ключевым при образовании саморасцепа вагонов, что недопустимо при эксплуатации.

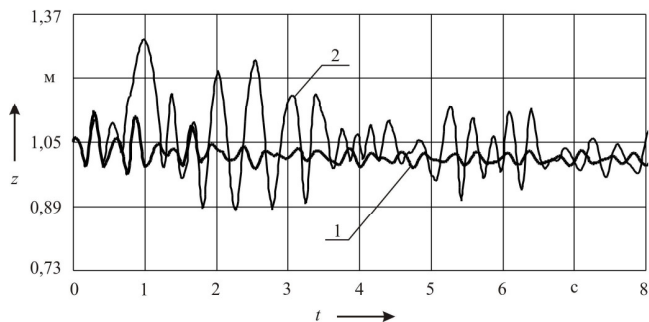


Рисунок 5 – Зависимости вертикальных перемещений головки автосцепного устройства от времени:

1 – без учета подвижности жидкого тела; 2 – с учетом подвижности жидкого тела

**Выводы.** Предлагаемый подход позволяет:

- 1) определить для рассматриваемого уровня заполнения котла жидкостью уравнение траектории движения ее центра масс и сил сопротивления перетеканию жидкого груза в зависимости от скорости его относительного движения;
- 2) описать продольную динамику железнодорожной цистерны с недоливом;
- 3) использовать разработанный алгоритм при анализе продольной динамики грузового поезда, состоящего из вагонов-цистерн с различным за-

Получено 18.10.2010

**A. V. Putsiata.** Simulation of direct dynamics of railway cisterns taking into account the possible incomplete filling of the boiler.

Simulation of direct dynamics of railway cisterns taking into account a possible incomplete filling of the boiler is developed, allowing operatively to examine operation the situations linked with dynamics of a bulk rolling stock. Realisation of an offered method is carried out in two stages: working out of models for the hydrodynamic analysis of a liquid weight in a boiler of the cistern and working out of dynamic model of the tankcar. The first stage is executed with use of program complex ANSYS where on the fundamentals finite-elements calculations trajectories of movement of the centre of masses of a liquid and force of its viscous drag in relative movement are defined. Working out at the second stage of solid-state dynamic model of the tankcar in a program complex «Universal mechanism» with application of the data received at the first stage, allows to receive wagon dynamic characteristics. Method approbation with reference to the railway cistern of model 15-1443 is executed. It is installed that the account of movability of a liquid concerning a tankcar boiler essentially influences its dynamics.

полнением котла жидким грузом;

- 4) применить получаемые динамические результаты при расчете на прочность кузовов вагонов.

#### Список литературы

- 1 **Богомаз, Г. И.** Динамика железнодорожных вагонов-цистерн [Текст] / Г. И. Богомаз. – Киев : Наукова думка, 2004. – 223 с.
- 2 **Высоцкий, М. С.** Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн [Текст] / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плещачевский, А. О. Шимановский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2006. – 320 с.
- 3 Интернет-портал Российской Федерации [Электронный ресурс] / Универсальный механизм: программы, руководство пользователя, презентации. – Брянск, 2010. – Режим доступа : [www.umlub.ru](http://www.umlub.ru). – Дата доступа : 15.09.2010.
- 4 **Сенько, В. И.** Прочность кузова железнодорожной цистерны с учетом перемещения перевозимого жидкого груза [Текст] / В. И. Сенько, А. В. Пуятю, А. О. Шимановский. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 210 с.
- 5 **Черкашин, Ю. М.** Динамика наливного поезда [Текст] / Ю. М. Черкашин // Тр. ЦНИИ МПС. – М. : Транспорт, 1975. – Вып. 543. – 136 с.
- 6 **Чигарев, А. В.** ANSYS для инженеров : справ. пособие [Текст] / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.